

ОСТАТОЧНЫЕ СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Ю.И. Пашков, М.А. Иванов, Р.Г. Губайдулин

RESIDUAL WELDING STRESSES AND WAYS TO REDUCE STRESS-CORROSIVE DESTRUCTION OF TRUNK GAS PIPELINES

Yu.I. Pashkov, M.A. Ivanov, R.G. Gubaidulin

Представлены материалы исследований остаточных сварочных напряжений в сварных трубах большого диаметра при технологическом процессе «лист – труба». Впервые установлена топография распределения остаточных напряжений в окружном и продольном направлениях по всему периметру и длине трубы. Исследованы пути снижения остаточных напряжений в трубе за счет локальной термомеханической обработки сварного соединения и разработки сварочной порошковой проволоки на мартенситной основе.

Ключевые слова: остаточные напряжения, сварка, сварное соединение, труба, стресс-коррозия.

The paper presents the results of studies of residual welding stresses in welded joints of large diameter pipes produced by the “sheet-pipe” process. The topography of distribution of residual stresses in circumferential and longitudinal direction in all the perimeter and length of the pipe is first established. The ways to reduce residual stresses in a pipe by means of local thermo-mechanical treatment of the welded joint and development of flux-cored welding wire on martensitic basis are also studied.

Keywords: residual stresses, welding, welded joint, pipe, stress-corrosion.

На современном этапе эксплуатации техногенноопасных магистральных газонефтепроводов зачастую происходят аварии, приносящие громадные материальные убытки и экологические серьёзные последствия природной фауне. Ежегодно в стране регистрируются более 100 разрушений данных промышленно опасных объектов. Основная причина аварий магистральных сетей – это коррозия основного металла и сварного соединения труб. На магистральных газопроводах за последние 10 лет эксплуатации их аварийность стала определяться коррозионным растрескиванием металла под напряжением (КРН) или стресс-коррозией. Доля аварий по причине КРН достигла более 40 %. При этом почти половина разрушений газопроводов происходят в зоне сварного соединения из-за наличия локальных остаточных сварочных напряжений. Эти остаточные напряжения в трубе могут накладываться на рабочие напряжения, ускоряя инкубационные стадии зарождения трещины в зонах сварного соединения, и обуславливать непрерывный рост коррозионного процесса – стадию роста трещины до разрушения газопровода.

Вопросам исследования влияния остаточных напряжений в сварных трубах на их несущую способность в условиях стресс-коррозии металла труб

до последнего времени практически не занимались. Более того, контроль остаточных напряжений в сварных трубах осуществлялся периодически и очень редко. Данный параметр никогда не нормировался, не учитывался при расчётах и не контролировался при технологических операциях в процессе изготовления сварных труб.

На Челябинском трубопрокатном заводе (ЧТПЗ) в 60-е годы XX столетия были проведены исследования по контролю остаточных напряжений в сварных одношовных трубах диаметром 720 мм из низколегированных сталей 19ГС, 14Г2 и 19Г [1]. Методика измерения остаточных напряжений в основном металле и зонах сварного соединения труб осуществлялась путем разрезания трубы на патрубки и тензометрированием. В результате контроля остаточных напряжений по периметру труб установлено, что тангенциальные (окружные) напряжения растяжения после экспандирования колеблются в широком диапазоне от 3,3 до 17,7 кг/мм², что составляет по максимальной величине около 50 % от предела текучести металла. Осевые остаточные напряжения в трубах изменяются от 0,9 до 13,3 кг/мм². В отдельных зонах на данных трубах зарегистрированы напряжения сжатия величиной от 1,5 до 4,3 кг/мм². Сохраняет-

ся широкий разброс остаточных напряжений как по периметру, так и по длине трубы.

В настоящее время проведен цикл экспериментальных работ по оценке остаточных напряжений в зонах сварного соединения и основного металла двухшовных труб размером 1020×12 мм из стали 08Г1НФБ класса прочности К60, изготовленных на ЧТПЗ [2]. Уровень остаточных напряжений в данных трубах контролировали на отдельных технологических операциях «лист – труба» (после сварки продольных швов, ЛТМО, экспандирование). Топографию контроля распределения остаточных напряжений по периметру трубы осуществляли неразрушающим методом с использованием магнитно-шумового прибора «Уралец». После сварки продольного шва распределение остаточных продольных напряжений подобно классическому, возникающему от действия мощного быстродвигающегося источника тепла. Однако тангенциальные напряжения в отличие от классического распределения в шве малы и близки к нулю. На расстоянии порядка 35 мм от шва остаточные сварочные напряжения растяжения равны 30–40 % от предела текучести. Вдали от шва на расстоянии примерно 150–250 мм, наоборот, продольные сжимаются до нулевых значений, тангенциальные – растягивающие и имеют относительно высокий уровень, близкий к пределу текучести основного металла.

Локальная термическая обработка (ЛТМО) сварного соединения благоприятно влияет на поле распределения остаточных напряжений. В шве продольные остаточные напряжения – сжимающие, а тангенциальные – растягивающие, но невысоких значений порядка $0,2\sigma_T$. Вне зоны ЛТМО напряжения меняют свои знаки: продольные растягивающие, тангенциальные – сжимающие по величине равные $0,3–0,4\sigma_T$.

Экспандирование труб после ЛТМО, проводимого при пластической деформации стенки трубы на величину 1,2 %, существенно меняет картину распределения остаточных напряжений. В околошовной зоне возникают растягивающие остаточные тангенциальные напряжения. Вдали от шва вне зоны ЛТМО в основном металле возникают остаточные тангенциальные напряжения сжатия, равные примерно по абсолютной величине околошовным напряжениям. Продольные напряжения наоборот вдали от шва – растягивающие, в районе шва – нулевые. Наибольшее значение интенсивности напряжений наблюдается вне зоны ЛТМО. Такая картина резкого изменения остаточных напряжений характерна для швов, выполненных последними. Вблизи сварного шва резко возросли остаточные напряжения растяжения до величины $0,6\sigma_T$.

Немецкими исследователями компании «РУРГАЗ АГ» исследовались остаточные напряжения в сварных трубах диаметром 1420 мм, с толщинами 15,7–18,7 мм из стали X70, изготовленных на Харцызском трубном заводе, Сумито

(Япония) и Европайп. Часть труб исследовалась с трещинами КРН. Контролировалось влияние остаточных напряжений в основном металле и сварном соединении на процессы КРН в магистральных газопроводах. Использовались два экспериментальных метода измерения остаточных напряжений в трубах. Метод разделения (МР-ТДУ), при котором трубы разрезались на патрубки и мелкие части. Измерение механических удлинений осуществляли при помощи датчиков деформаций ТДУ. Второй метод несквозных отверстий (РНО), при котором на трубе сверлились небольшие по размеру несквозные отверстия (диаметром 1,5 мм и глубиной 1,6 мм). Вокруг высверленной лунки освобождаются остаточные напряжения, которые замеряются с помощью тензодатчиков. Полученные экспериментальные результаты по остаточным напряжениям проверялись расчётным путём по методу конечных элементов. По мнению авторов, налицо было хорошее соответствие всех трёх методов контроля остаточных напряжений.

Результаты контроля остаточных напряжений в данных сварных трубах свидетельствуют о их широком разбросе в пределах одной трубы, а также от одной трубы к другой. В трубах существуют локальные зоны остаточных напряжений сжатия и растяжения с величинами от -50 Н/мм^2 до $+320 \text{ Н/мм}^2$. Встречаются отдельные точки на трубах с величиной остаточных напряжений до 500 Н/мм^2 . Фактически эти измерения полностью подтверждают вышеизложенные результаты исследований остаточных напряжений в основном металле и сварных соединениях газопроводных сварных трубах.

Таким образом, в сварных трубах больших диаметров установлено наличие остаточных напряжений в основном металле и сварных соединениях, достигающих в отдельных случаях величин, равных пределу текучести основного металла. Это поле остаточных напряжений накладывается на рабочие напряжения, ускоряя стресс – коррозионные процессы разрушения магистральных газопроводов. Становится очевидным, что необходимо разрабатывать мероприятия по снижению остаточных сварочных напряжений в трубах.

Существуют многочисленные методы снижения остаточных сварочных напряжений: проковка, обжатие, ударно-волновое воздействие, ультразвуковая обработка, ЛТМО, объёмная термообработка и другие. Последние два метода находят применение при производстве сварных труб, в частности, проверена технология ЛТМО по снижению остаточных напряжений в рамках настоящей работы. Кроме того проведены исследования по разработке сварочных материалов по снижению остаточных напряжений в трубах.

В работе [3] проведены комплексные исследования по созданию сварочной проволоки для сварки труб, позволяющей создавать в сварном шве либо сжимающие остаточные напряжения, либо растягивающие в 5 раз ниже чем существ-

вующая технология. Кроме того применение новой сварочной порошковой проволоки мартенситного класса позволяет снизить растягивающие остаточные сварочные напряжения в околошовной зоне в 2–4 раза по сравнению с напряжениями, возникающими при сварке проволоками аустенитного и феррито-перлитного классов. Установлено, что при многопроходной сварке разработанной сварочной проволоки мартенситного класса остаточные деформации отсутствуют при первых 3–4 проходах, при последующих проходах деформация возрастает, но величина её в 3–10 раз меньше, чем при существующей технологии сварки труб.

Исследования проведены на сталях 17Г1С и 15ХСНД с использованием сварочной проволоки Св-08Г2С и Св-08ХМ (феррито-перлитная), Св-06Х19Н9Т (аустенитная) и разработанной порошковой проволоки мартенситного состава (никель 4,5–5,5 %, хром 0,5–0,6 %, молибден 0,3–0,5 %, марганец 1,3–1,5 %, кремний 0,3–0,4 %, ванадий 0,14–0,2 %, иттрий $\leq 0,019$ %, углерод $\leq 0,05$ %, железо – остальное). В качестве защитной среды использовали углекислый газ, сварочные флюсы марок АН-60 и АН-348. Измерение остаточных напряжений осуществляли на столбиках диаметром 20 мм, вырезаемых электроэрозией

ным способом из сваренных образцов, на которые предварительно наклеивались тензодатчики.

Механические испытания образцов, сваренных опытной проволокой, показали, что ударная вязкость металла шва равнозначна ударной вязкости основного металла и технологическая прочность (образование горячих трещин) полностью удовлетворяет нормативным требованиям для сварных труб.

Литература

1. Морозов, А.Н. Исследование макронапряжений в поверхностных слоях экспандированных труб: отчёт о НИР / А.Н. Морозов, В.И. Суворова. – Челябинск, 1962.

2. Анисимов, Ю.И. Исследование качества и работоспособности сварных соединений труб размером 1020×12 мм после ЛТМО, изготовленных на опытной установке цеха № 6: отчёт о НИР // Ю.И. Анисимов, Ю.И. Пашков. – Челябинск, 2000.

3. Исследование опытной сварочной проволоки для повышения хладостойкости и снижения уровня остаточных напряжений в сварном соединении газо-нефтепроводных труб: отчёт о НИР / А.В. Пряхин, А.С. Табатчиков, Ю.И. Пашков, И.И. Сергеев. – Челябинск; Свердловск, 1982.

Поступила в редакцию 14 декабря 2011 г.